

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Forschungsprojekt

Adaption und Weiterentwicklung der Photovoltaik-Dünnschichttechnologie für Kompositpaneele mit teils farbigem Glas für den Einsatz in vorgehängten hinterlüfteten Fassaden
PV-VH-Fassaden

Kurzbericht 29.07.2008

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Bearbeiter

Dr.-Ing. Susanne Rexroth

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(AZ: Z6-10.08.18.7-06.9/II2-F20-06-027)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion

D-01062 Dresden

Telefon +49 351 46 33 48 45
Telefax +49 351 46 33 50 39

www.bauko.bau.tu-dresden.de

1 Ziel der Forschungsaufgabe

Das Forschungsprojekt befasst sich mit der Adaption und Weiterentwicklung der Photovoltaik- (PV-) Dünnschichttechnologie für Kompositpaneele in vorgehängten hinterlüfteten (VH) Fassaden, die die Akzeptanz und Verbreitung von PV-Modulen im Bauwesen verbessern werden. Die neuen PV-Module, appliziert auf Standard-Fassadenelemente, sind teils mit farbigem Deckglas ausgerüstet.

Die vorgehängte hinterlüftete (VH) Fassade ist durch die konstruktive Trennung der Funktionen Wärmeschutz und Witterungsschutz ein hochwirksames System, das im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Ökologie, Langlebigkeit sowie Behaglichkeit gleichermaßen im Neubau wie in der Sanierung eingesetzt wird. In Kombination mit nachträglichen Wärmedämmmaßnahmen bewirkt sie ein hohes Energieeinsparungspotenzial. Mit individuellen Dämmstoffdicken lassen sich Werte erzielen, die den Wärmeschutzstandard für Niedrigenergiehäuser erfüllen. Neben den Bekleidungen aus Platten oder Tafeln mit Materialien wie z. B. faserverstärktem Harzkomposit, Faserzement, Keramik, Ziegel oder Metall stehen auch Trägerplattensysteme für Applikationen mit Putz, Glas, Keramik oder Metall zur Verfügung. Rückseitige Agraffenhalterungen an der Trägerplatte ermöglichen eine verdeckte Befestigung und homogene farbige, glatte Fassadenoberflächen. Durch diese Elemente lassen sich moderne Hüllkonstruktionen mit den hohen Ansprüchen qualitätvoller Fassadensanierung vereinen.



Abbildung 1 VH-Fassade mit irisierenden Glas-Kompositelementen (rückseitig befestigt) am Dienstleistungs- und Service-Center der GEWOGE, LUWOGES BASF GmbH in Ludwigshafen.
Architekten: Allmann Sattler Wappner

Aufgrund der Hinterlüftung ist die VH-Fassade sehr gut für die Integration von PV-Modulen als Bekleidung geeignet. Sie erlaubt einfache elektrische Anschlusslösungen im nicht sichtbaren Bereich mit Standardanschlussdosen auf der Modulrückseite und einer Leitungsführung in der Ebene der Wärmedämmung. Zu Wartungs- und Reparaturzwecken sind die Elemente gut zugänglich und einzeln austauschbar.

Aus architektonischer Sicht kann das additive Anbringen von PV-Anlagen auf oder an Gebäuden häufig nur wenig überzeugen. Für eine stärkere Verbreitung gebäudeintegrierter PV-Fassadensysteme fehlt es an neuen, innovativen Techniken und Materialien. Deshalb trifft die PV-Technologie in der Architektur bei Planern, Bauherren und Behörden bisher auf verhaltene Akzeptanz. Dies liegt – neben den relativ hohen Kosten und dem noch fehlenden Know-How bei den Architekten und Planern – nicht zuletzt an der begrenzten Produktpalette und dem expressiven Design herkömmlicher Photovoltaikmodule mit kristallinen Siliziumzellen. Seitens der Energieplaner wiederum bestehen Vorbehalte gegenüber integrativen Lösungen, da übliche PV-Module nicht den konstruktiven Anforderungen in der Fassade entsprechen und mit erheblichem technischen und bauaufsichtlichen Mehraufwand gegenüber additiven Lösungen verbunden sind.

Können PV-Module in die Fassade von Gebäuden integriert werden, so erfüllen sie neben der Energieerzeugung wichtige architektonische und konstruktive Aufgaben. Aufgrund ihrer günstigen Materialeigenschaften durch die Verbundglastechnologie und durch die Kombination mit anderen Baumaterialien sind sie attraktive und innovative Bauprodukte für eine energetisch aktive Gebäudehülle. Viele grundlegende Fragen zur Verwirklichung sind allerdings noch offen. So liegen insbesondere für moderne Glasfassadensysteme mit PV nur wenige Erfahrungen und Erkenntnisse zum Langzeitverhalten vor. Diese haben jedoch für Wirtschaftlichkeit, Energieeinsparung und Nachhaltigkeit eine hohe Bedeutung. Außerdem bestehen Fragen hinsichtlich der technischen und konstruktiven Ausgestaltung sowie der baurechtlichen Einordnung.

Die Dünnschichttechnologie eröffnet gegenüber herkömmlichen Solarzellen aus Silizium neue und erweiterte Produktions- und Gestaltungsmöglichkeiten. Ein Standardmodul mit Dünnschichtzellen hat eine dunkelgraue und homogene Oberfläche. Aus dem EU-Projekt BIPV-CIS¹, an dem drei der Projektpartner beteiligt waren, steht bereits ein breites Spektrum an Oberflächenmodulationen, insbesondere auch von Farben, für die Gebäudeintegration von PV-Modulen (BIPV) auf der Basis von Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) zu Verfügung. Die neuen Dünnschichtmodule lassen sich mit ihren Texturen und Strukturen dem baulichen Kontext besser anpassen. Sie bieten ideale Voraussetzungen für die ansprechende Integration in Fassaden und die Kombination mit einer energiesparenden Bautechnik wie der VH-Fassade. Die zu entwickelnden Kompositelemente aus einer Blähglas-Trägerplatte und einem optional farbigen PV-Dünnschicht-Modul erweitern das Repertoire der gestalterischen Ausdrucksmöglichkeiten, bieten einen robusten und dauerhaften Witterungsschutz und produzieren zudem noch Strom.

In Architektur und Bauwesen sind seit Jahren ein großes Interesse und eine hohe Nachfrage nach Ganzglasfassaden zu verzeichnen, was zahlreiche Neubauprojekte im In- und Ausland belegen. Darüber hinaus ist Farbigkeit als Gestaltungsmittel in Architektur und Stadtbild seit der Klassischen Moderne z. B. mit Bruno Taut Thema der Architektursprache. Farbige Glasfassaden sind Garant für eine hohe architektonische und städtebauliche Qualität.

Ziel des Forschungsvorhabens ist im Wesentlichen, grundlegende Voraussetzungen für die Integration von PV-Elementen in farbige VH-Glasfassaden zu schaffen. Dabei soll die PV-Dünnschichttechnologie prototypisch adaptiert und weiterentwickelt werden. Mit dieser Vorgehensweise soll die Produktforschung in der Industrie gefördert und die damit verbundene Markteinführung forciert werden. Die Entwicklung innovativer Baumaterialien und Bautechniken könnte somit einen wesentlichen Impuls erfahren, die Innovationsfähigkeit des Bauwesens gesteigert werden und die internationale Wettbewerbsfähigkeit im PV-Bereich und bei Fassaden gestärkt werden.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

Die Forschungsziele wurden in einem interdisziplinären Team aus Wissenschaft, Industrie und Praxis realisiert. Beteiligt waren das als Projektleitung fungierende Institut für Baukonstruktion und das Institut für Baubetriebswesen der Technischen Universität Dresden, das Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW) sowie die Industriepartner StoVerotec GmbH und Würth Solar GmbH & Co. KG. Ausgehend von einer Markt- und Patentrecherche in den Bereichen VH-Fassadentechnik und Photovoltaik-Fassaden analysierte das Projektkonsortium die grundlegenden Techniken der Dünnschichttechnologie, um sie für die Produktion von Prototypen für PV-VH-Fassaden zu modifizieren.

¹ EU-Projekt BIPV-CIS – Improved Building Integration of PV by using Thin Film Modules in CIS Technology

Hierzu wurden Kriterien und Anforderungen abgeleitet, technische Realisierbarkeiten geprüft und baurechtliche Rahmenbedingungen geklärt. Weil demnach die bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden farbigen PV-Dünnschichtmodule für die VH-Kompositpaneele nicht tauglich waren, wurde ein weiterer Industriepartner hinzugezogen: Die Firma DELO Industrie Klebstoffe führte Untersuchungen an Probemodulen im Labormaßstab aus. Im Anschluss wurden Versuchsstände für die Herstellung und Anwendungsprüfung verschiedener Prototypen von PV-Modulen aufgebaut. Wichtige Teilaufgaben waren unter anderem die Anpassung des Erscheinungsbildes der VH-Fassaden, die Sicherung der Farbigkeit, die elektrische Kopplung der PV-Module sowie die Analyse und Bestimmung der chemischen und physikalischen Anforderungen an geeignete Materialien zur Klebung der Kompositschichten. Im Laufe des Projekts erwies es sich als sinnvoll, die Bauteilversuche um Brandversuche zu erweitern, da das Brandverhalten ein neues Bauprodukt wesentlich charakterisiert. Um die praktische Anwendung der PV-Dünnschichttechnologie in Bauprodukten als auch die Lebensdauer und Langzeitwirkungen zu evaluieren, wurden aus den erfolgreichsten Modulen Prototypen eines Fassadenelements hergestellt.

Die Untersuchungen umfassten weiterhin Lebenszyklus (LC)-Analysen, die die Vorteile und Potenziale der PV-Dünnschichttechnologie nachwiesen. In Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren lieferten exemplarische Simulationen mit einem eigens entwickelten Tool allgemein gültige Aussagen bezüglich der Wirtschaftlichkeit. Zugleich zeigen die Ergebnisse ein hohes Nutzenpotenzial für die Verwirklichung von Energie- und CO₂-Einsparungen bei Gebäuden auf.

Den Abschluss der Projektarbeit bilden Empfehlungen für die Praxis und deren Publikation zum Wissens- und Technologietransfer. Um die Akzeptanz von PV-Elementen als gleichwertiges Bauprodukt mit zusätzlichem Mehrwert der Stromerzeugung zu etablieren, muss die Wissenslücke bei Bauherren, Architekten und Planern zur Forschungsebene geschlossen werden. Dazu bedarf es eines verstärkten Know-how Transfers und leicht zugänglichen Fachinformationen. Im Projektzeitraum und darüber hinaus wurden und werden daher die Ergebnisse auf einschlägigen Messen und Konferenzen in den Bereichen Bauwesen wie Photovoltaik vorgestellt und vielseitig publiziert.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Als wesentliches Ergebnis entstand der Prototyp eines Kompositpaneels mit einem applizierten PV-Dünnschichtmodul aus CIS-Solarzellen. Durch die verdeckte Befestigung an der Rückseite entfällt der Glaseinstand üblicher punkt- oder linienförmiger Klemmhalterungen. Stattdessen ergibt sich eine optisch homogene und uneingeschränkt zur Energieerzeugung nutzbare Vorderseite. Eine weitere Neuerung ist die flexible Farb- und Oberflächengestaltung.

3.1 Ermittelte Grundlagen

Wichtige Rahmenbedingungen für den praktischen Einsatz der neuen Elemente bilden die architektonischen, baurechtlichen, bauverfahrenstechnischen, physikalischen und elektrotechnischen Kriterien. Im Städtebau sind Aufgabe und Funktion von Farbe, wie auch ihre Wirkung, vielfältig. Die Wahl der Farbe kann die Orientierung, Ästhetik, Stimmung und Lesbarkeit beeinflussen. Als Gestaltungselement ist Farbe vielseitig einsetzbar; sie erlaubt es, Akzente zu setzen und gezielt Ein- und Ausblicke zu betonen. Viele Fassaden erlangen erst durch Farbe ihre Plastizität, da in unseren Breiten das Licht allein oft nicht ausreicht, um das Plastische eines Gebäudes hervorzuheben. Der Einsatz von Farbe kann Gebäude und damit den Stadtraum dynamischer und vieldimensionaler machen. Auch können farbige Fassadenelemente eine unterschiedliche Tag- und Nachtwirkung hervorrufen.

In Anbetracht der Vielfalt an Konstruktionen und der selbst im konventionellen Glasbau noch unzureichenden Bauregeln werden sich PV-Elemente auf absehbare Zeit nicht als geregelte Bauprodukte

etablieren. Die technischen Regeln für Verbundglasaufbauten sind für die PV-VH Kompositelemente nicht anwendbar. Der komplizierte Genehmigungsprozess sowie der zusätzliche Zeit- und Kostenaufwand erwiesen sich in der Vergangenheit als Barriere für den Einsatz der ohnehin kostenintensiven Photovoltaiktechnologie in der Fassade. Der Weg über Produktzulassungen erscheint daher kurz- und mittelfristig die beste Lösung für eine spätere Markteinführung. Im Projektverlauf wurden geeignete Prüfverfahren für eine allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung (abZ) untersucht. Bauteilversuche an kleinformigen PV-Modulproben ergaben, dass die mit Solarzellen beschichteten Scheiben die geforderte Festigkeit von Floatglas einhalten und die Haftfestigkeit des Modulverbunds eine ausreichende Sicherheit gegenüber den maximal zu erwartenden Beanspruchungen aufweist. Die Eignung für den Einsatz der PV-Module in den Fassadenelementen ist also grundsätzlich gegeben.

Ähnlich sind Photovoltaikmodule hinsichtlich des Brandschutzes nicht charakterisiert und definiert. Je nach ihrem Einsatz müssen Fassadenelemente bestimmte Anforderungen erfüllen. Eine Klassifizierung ohne Prüfung (Brandversuche) ist für PV-Elemente mangels versuchstechnischer Erfahrung nicht möglich. Im Rahmen des Projekts wurden Brandversuche an Prototypen der PV-Module extern beauftragt und dienten als erste Basis für eine Einordnung. Die Ergebnisse legen nahe, dass die PV-Verbundgläser der Fa. Würth nicht dieselbe Brandklasse B1 erreichen wie die Trägerplatten der Fa. StoVerotec und die Kompositelemente ebenfalls ein schlechteres Brandverhalten aufweisen werden.

Darüber hinaus müssen die Wahl geeigneter Materialien, Anordnungen, Bemessungen und Ausbildungen aller Bestandteile der Fassadenkonstruktion die Standsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit und die Langlebigkeit der Fassade gewährleisten. Die gebräuchliche mechanische Belastungsprüfung von Solarmodulen gemäß DIN EN 61646 erfolgt mit 2400 Pa bzw. optional mit 5400 Pa. Auf erhöhte Lasten oder Anforderungen entsprechend DIN 1055 Teil 4 kann durch Verwendung größerer Glasstärken für das Deckglas reagiert werden. Bauverfahrenstechnische Kriterien bestimmen den Bauablauf von der Planung und Montage bis zur Nutzung und Entsorgung maßgeblich mit und müssen bei der Produktentwicklung Beachtung finden.

Beim Aufbau eines flächig mit der Trägerplatte verklebten PV-Moduls sind Parameter wie der relevante Temperaturbereich und der Längenausdehnungskoeffizient der zu verbindenden Elemente von Interesse sowie der U-Wert der Trägerplatte, um die zu erwartende Temperaturerhöhung des Moduls und deren Auswirkung auf die elektrischen Parameter abzuschätzen.

3.2 Weiterentwicklung der farbigen Dünnschicht-PV-Module

Die aus dem Forschungsprojekt BIPV-CIS vorliegenden Farbmodule erwiesen sich für die vorgesehene vollflächige Klebung ohne mechanische Sicherung des Deckglases als verbesserungsbedürftig. Die dort für einen kräftigen Farbeindruck eingeführte optische Entkopplung des Modulverbunds ist im Randbereich nicht möglich, da dort das Deckglas physikalisch mit dem Rand verbunden ist. So unterscheidet sich die Farbigekeit am Rand stets von der übrigen Fläche. Weitere Schwierigkeit bereitete die Gewährleistung der Standfestigkeit, weil die gesamte Gewichtskraft des Deckglases über den Randverbund abzutragen wäre. Dieser Aufbau wurde von den Projektpartnern daher verworfen und andere Lösungen entwickelt.

Zunächst wurde ein fein strukturierter Klebstoffauftrag beispielsweise in Linien- oder Punktform für eine verteilte Krafteinleitung untersucht. Ein kräftig eingefärbter Klebstoff könnte außerdem bei ungefärbten Deckgläsern einen Farbeindruck erzielen. Versuche mit einem im industriellen Maßstab bestens bewährten Klebstoff scheiterten jedoch an den hier erforderlichen großen Formaten aufgrund des Schrumpfverhaltens des Klebstoffs. Bereits nach 500 h Feuchte-Wärme-Test brach die Klebung zusammen. Es waren Undichtigkeiten, Feuchte und Korrosion im Modulinneren zu sehen.

Als Alternative wurden mehrere Deckgläser halbseitig mit Zinkoxid beschichtet, um eine zusätzliche Schicht mit abweichendem Brechungsindex einzubringen. Diese Farbgläser lassen sich flächig laminieren, so dass der Nachteil des ungünstigen Kraftverlaufs entfällt. Für einen homogenen Farbeindruck wäre allerdings ein weiterer Bedruckungsschritt im elektrotechnisch erforderlichen Randbereich notwendig. Zudem ist die Intensität des optischen Effektes abhängig vom Blickwinkel und von der Beleuchtungssituation, weshalb auch diese Variante von den Projektpartnern nicht weiterverfolgt wurde.

Dichroitisch beschichtete Gläser, deren Farbe sich mit dem Betrachtungswinkel und dem Einstrahlungsspektrum ändert, waren die vierte untersuchte Lösung. Modulmuster mit diesen neuen Architekturgläsern in den Farben Blau/Gold, Grün/Gold, Blau/Grün und Grün – die doppelte Farbangabe bezieht sich auf die Durchsicht sowie Draufsicht – ergaben einen sehr intensiven Farbeffekt. Der Randbereich spielt eine untergeordnete Rolle. Die noch sehr schwach erkennbaren Konturen würden bei einer Schwärzung des Randbereichs verschwinden. Eine Veränderung des Betrachtungswinkels führt zu einer Veränderung der Farbe, nicht aber der Intensität. Bezogen auf die Spektralempfindlichkeit von CIS wurde eine Transmission von ca. 50 % ermittelt. Einen höheren Transmissionswert von ca. 72 % ergaben semitransparent verspiegelte Glasscheiben, allerdings ist hier der Randbereich entsprechend stärker zu sehen. Für größere Mengen stellte der Glashersteller die Möglichkeit in Aussicht, die Reflexion der Scheiben anzupassen, um die CIS-spezifische Transmission zu erhöhen. Neben der unzureichenden Transmission ist die ungeklärte Eignung der Gläser für den Einsatz im Freien problematisch. Sie sind somit eine interessante Option für zukünftige Entwicklungen, bedürfen aber weiterer Untersuchungen, die über den Rahmen des Forschungsprojektes hinausgehen.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich der visuellen Qualitäten versprochen anorganisch beschichtete Deckgläser. Als Benchmark für ihre Weiterentwicklung zu Prototypen für VH-Fassadenelemente wurden Wirkungsgradeinbußen von maximal 30 % gegenüber herkömmlichen schwarzen CIS-Modulen festgelegt. Strommessungen an Farbgläsern und Prototypen in den Farben grün, blau, rot und gelb jeweils in drei bis vier Intensitätsabstufungen lassen Leistungsverluste von 4 bis 10 % (blau), 9 bis 20 % (rot und gelb) und 11 bis 25 % (grün) erwarten. Je intensiver die Farbe, desto höher der Leistungsverlust.



Abbildung 2 hergestellte Prototypen der farbigen Dünnschicht-PV-Module für VH-Fassaden

3.3 Prototyp eines VH-Fassaden-Elementes mit farbigem Dünnschicht-PV-Modul

Gemäß den Herstellrichtlinien des VH-Fassadensystems StoVerotec Glas wurde ein provisorisches Fassaden-Mockup zu Testzwecken und zur Demonstration des Forschungsprojekts beispielsweise auf Messen erstellt. Die Montage der PV-Module und der VH-Fassadenelemente soll sowohl im Hochformat als auch im Querformat möglich sein, um den architektonischen Ansprüchen zu genügen. Als unproblematisch erwies sich die Lage der Modulanschlussdose.

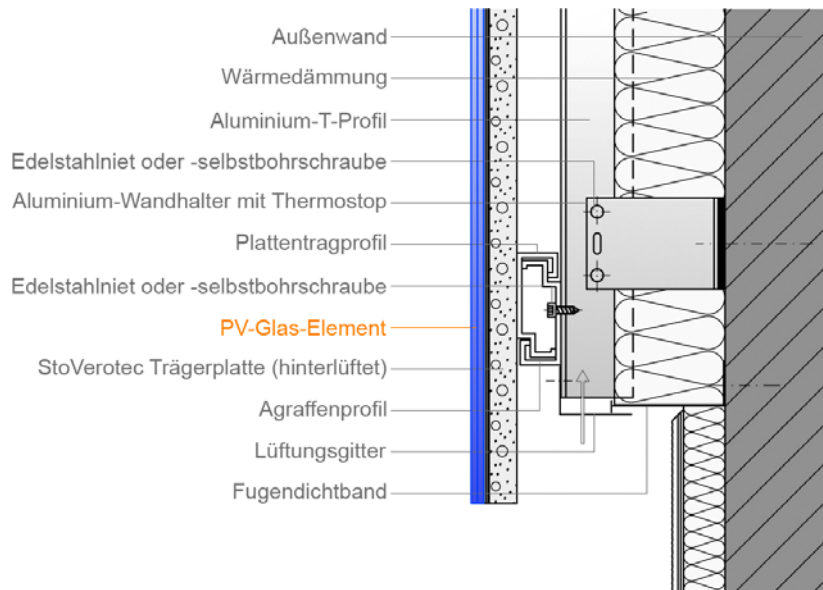


Abbildung 3 Systematischer Schnitt (Prinzipkizze) durch die Fassadenkonstruktion

Die experimentellen Untersuchungen am Prototypen umfassten insbesondere das Temperatur- und Langzeitverhalten. Eine Erhöhung der Zelltemperatur führt bei CIS-Modulen zu einer Reduzierung der Ausgangsleistung von rund $-0,45\ \%/K$. Für auf Glasschauplatten aufkaschierte CIS-Module geht das ZSW bei senkrechtem Einbau in Mitteleuropa von einer Temperaturerhöhung von 5 bis 6 K im Vergleich zu frei aufgeständerten CIS-Modulen und von einer maximalen Betriebstemperatur von rund $75\ ^\circ\text{C}$ aus. Aufgrund dessen ist es angebracht, die Grenztemperaturen bei Außenwandbekleidungen in VH-Fassaden gemäß DIN 18516 von $-20\ ^\circ\text{C}$ bis $+80\ ^\circ\text{C}$ auch für die PV-Elemente anzusetzen. Dies liegt immer noch im Prüfbereich der DIN EN 61646, welche Temperaturen von $-40\ ^\circ\text{C}$ bis $+85\ ^\circ\text{C}$ zugrunde legt. Diese Qualifizierungsnorm beinhaltet unter anderem Labortests zur Dauerfestigkeit. PV-Module, die sämtliche Tests erfolgreich durchlaufen haben, gelten als zuverlässig und langlebig.

In der Umweltsimulationsanlage der Fa. Sto wurde eine Prüfwand mit vier farbigen PV-Modulen nach der Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht (ETAG 004) künstlich bewittert. Die Prüfung umfasste einen Wärme-Regen-Zyklus und einen Wärme-Kälte-Zyklus und erstreckte sich über 25 Tage. Das Element hat die Prüfung ohne Schädigung, Ablösungen bzw. Rissbildungen oder sonstige Mängel überstanden. Die PV-Module wiesen wenige Zentimeter unterhalb der oberen Elementkante leichte Trübungen (2 bis $3\ \text{cm}^2$) hinter dem Deckglas auf. Es sollte noch geklärt werden, ob dies konstruktiv bedingt ist oder ob hier Feuchtigkeit angelagert wurde.



Abbildung 4 PV-Element nach der Bewitterung; links: Frontseite mit optischer Trübung der Folie im Kantenbereich; rechts: Rückseite mit Anschlussdosen und Unterkonstruktion aus vertikalen T-Profilen und Laschenprofilen aus Aluminium

3.4 Life-Cycle-Analysen

Die Life-Cycle-Analysen (LCA) dienen dem Ziel, allgemein gültige Aussagen bezüglich der Wirtschaftlichkeit der neuartigen Fassadenbauteile in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren treffen zu können. Mit einem im Rahmen des Projekts entwickelten Simulationstool wurden die Einnahmen und Ausgaben über 20 Betriebsjahre den Lebenszykluskosten einer VH-Fassade mit Glasbekleidung als Referenz gegenübergestellt. Die exemplarische Analyse umfasste unterschiedliche Szenarien mit variablen PV-Modulfarben, Fassadenausrichtungen, Anlagengrößen und Systemtechnikparametern an sechs repräsentativen Standorten in ganz Deutschland. Ebenso flossen Fördermöglichkeiten und unterschiedliche Finanzierungskonditionen ein.

Zu den Ausgaben zählen alle Investitions- und Folgekosten. Die Herstellkosten der PV-VH-Fassade setzen sich aus den PV-Modulkosten laut Hersteller, den Kosten für die Unterkonstruktion sowie die elektrische Systemtechnik zusammen. Die Differenz zu den in der Bauwirtschaft recherchierten Herstellkosten der VH-Referenzfassade beträgt etwa 300 €/m². Der komplexere Planungs- und Koordinationsaufwand der PV-VH-Fassade wurde mittels doppelt so hohen Planungskosten berücksichtigt. Die jährlichen Betriebskosten für Versicherung, Zählermiete, Betriebsführung, Rückstellungen für Reparaturen, Wartung und Instandhaltung gingen in Höhe von 1 % der jeweiligen Investitionskosten sowie mit einer Inflationsrate von 1 % in die Simulationen ein.

Die Einnahmen der PV-VH-Fassade ergeben sich aus der Einspeisevergütung für den ins Netz eingespeisten Solarstrom nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) bei einer Inbetriebnahme im Jahr 2008 inklusive dem Zuschlag von 5,0 Cent/kWh für gebäudeintegrierte Fassadenanlagen. Die Vergütung ist über den Rest des angefangenen Betriebsjahres plus 20 volle Kalenderjahre festgelegt. Zur Ermittlung der erzielbaren Jahreserträge sind in dem Simulationstool Eingangsparameter wie die standortspezifische Sonneneinstrahlung, prozentuale Einbußen infolge von Verschattungen, typische Werte für die Anlagengüte (Performance Ratio PR²) und Leistungsverluste aufgrund der Farbigeit der PV-Module einstellbar. Für die CIS-Module wird eine jährliche Leistungsdegradation aufgrund von Alterungserscheinungen in Höhe von 0,3 % ab dem 3. Betriebsjahr angesetzt.

Bis zu +/- 30° Abweichung von der Südausrichtung erwiesen sich die PV-Fassaden an allen betrachteten Standorten bei Farbmodulen mit bis zu 20 % Leistungsverlust als wirtschaftlich rentabel innerhalb der 20-jährigen Betriebszeit. An sonnenreichen Standorten in Süddeutschland lieferten auch Südost- und Südwestfassaden mit +/- 60° Südabweichung positive Ergebnisse. An besonders guten Standorten können selbst reine Ost- und Westausrichtungen mit 10 % leistungsreduzierten Farbmodulen noch wirtschaftlich sein, wenn die Rahmenbedingungen günstig sind. Bei der Vielzahl an möglichen Szenarien bleibt die Wirtschaftlichkeit jedoch im Einzelfall zu prüfen. In einigen Fällen wird dabei keine Wirtschaftlichkeit des Systems erzielt werden können. Ertragsmindernde Verschattungen beispielsweise wurden in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Mit zunehmender Anlagengröße wiederum verbessert sich die Rentabilität bei südlichen Ausrichtungen. Generell sind die Chancen groß, PV-Anlagen über die betrachtete Laufzeit von 20 Jahren hinaus zur Erzeugung von PV-Strom einzusetzen. Dadurch würden sich die ermittelten Ergebnisse weiter zu Gunsten der PV-VH-Fassade verändern. Dennoch lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass sich das PV-VH-Fassadensystem derzeit lediglich für repräsentative Gebäude mit hochwertigen Fassaden wirtschaftlich darstellen lässt.

Eine nachträgliche Fassadendämmung ermöglicht im Gebäudebestand bis zu 40 % Energieeinsparung. In Kombination mit integrierten PV-Modulen sind zudem regenerative Energiegewinne von jährlich rund 700 kWh Strom pro kW_p installierter Leistung zu erwarten, verbunden mit einer CO₂-

² Der Wert enthält Reflexionsverluste, Modulverschmutzung, den geringeren Modulwirkungsgrad bei niedrigerer Einstrahlung und höheren Temperaturen, Anpassungsverluste, Wechselrichterverluste, Leitungsverluste und ggf. Verschattungsverluste

Minderung von ca. 620 kg CO₂/kW_p. Bei CIS-Dünnschichtmodulen entspricht dies je nach Farbmodulation einem jährlichen Solarstromertrag von ca. 55 bis 80 kWh/m², der im Jahr Emissionen in Höhe von 50 bis 70 kg CO₂/m² vermeidet.

3.5 Einsatzpotenziale

Am Beispiel einer gebauten PV-Fassade am Wohnhochhaus Helene-Weigel-Platz in Berlin wurden die die Vorzüge des PV-VH-Systems visualisiert. Während die realisierten polykristallinen Module mit ihrer typischen Eisblumenstruktur und Rasterung das Erscheinungsbild expressiv prägen, entsteht mit den neu entwickelten Dünnschichtmodulen eine homogene Fassadenfläche ohne sichtbaren Randstreifen. In dem neuen System lassen sich Modulationen in Farbe und Oberfläche, wie sie bisher mit konventionellen PV-Modulen nur durch die Auswahl bestimmter Solarzellentypen und des rückseitigen Glas- oder Folienmaterials sowie durch die Kombination mit anderen Bekleidungs-elementen möglich waren, mit einer Zell- und Modultechnologie umsetzen. Darüber hinaus ist die Trägerplatte mit den unterschiedlichsten Oberflächen wie Glas, Putz, Naturwerkstein oder Keramik ausführbar und erlaubt eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten im selben Fassadensystem. Dem Architekten steht nun frei, die PV-Fläche als Akzent zu den restlichen Fassadenflächen oder integriert in das Gesamtbild der Fassade zu planen. Dazu müssen Hersteller und Planer konstruktive Ausführungen ausarbeiten und die Systeme standardisieren, zum Beispiel für eine optimale Leitungsführung im Fassadenelement. Des Weiteren muss aus den schon vorhandenen Systemen eine Fassaden-Befestigungstechnik entwickelt werden, die auf die Belange der Photovoltaik-Fassadenelemente abgestimmt ist, auf der Baustelle aber keine sonderlichen Änderungen im bekannten Bauablauf hervorruft.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Fassadenbonus bei der Einspeisevergütung nach EEG in Höhe von 5 Cent/kWh derzeit nicht ausreicht, um die Mehrkosten und die geringeren Erträge gegenüber Standardanlagen auf Dächern und Freiflächen auszugleichen. Maßgebend für den Erfolg am Markt und einen breiten Einsatz wird daher die künftige Entwicklung der Kosten sein. Da die CIS-Technologie hinsichtlich ihrer Produktionstechnologien auch auf lange Sicht Entwicklungspotenzial besitzt, können weitere Kostensenkungen in den nächsten Jahren unterstellt werden.

Bezüglich des ästhetischen, konstruktiven und elektrischen Langzeitverhaltens der neuen Kompositenlemente, aber auch generell von PV-Modulen in der Fassade, insbesondere bei Dünnschichtmodulen, fehlen langjährige Erfahrungen und Studien. Hier ist weitere Forschungs- und Aufklärungsarbeit vonnöten, um die Innovationsfreudigkeit nicht wegen des Haftungsrisikos für Planer, Bauausführende und Bauüberwachende sowie des Investitionsrisikos des Bauherrn zu bremsen.

Vor dem Hintergrund dieser grundlegenden, aber praxisnahen Forschung zur Entwicklung von Produktionstechnologien, der erfolgreichen Herstellung von Prototypen und dem Nachweis der Potenziale im praktischen Einsatz erklären die Praxispartner ihr konkretes Interesse an einer schnellen Überführung der gewonnenen Ergebnisse in die Entwicklung marktfähiger Produkte. Eine weite Verbreitung der neuen Erkenntnisse zur PV-Dünnschichttechnologie und der Möglichkeiten durch die Integration in VH-Fassaden soll außerdem durch Publikationen und die Einbindung in Forschung und Lehre sichergestellt werden. Die schnelle Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis ist somit gegeben.